

하천범람과 내수침수의 개별적·복합적 고려에 따른 흐름 특성의 수치적 비교

최상도¹, 엄태수¹, 신은택¹, 송창근^{2*}

¹인천대학교 안전공학과 박사과정, ²인천대학교 안전공학과 부교수

Numerical Comparisons of Flow Properties Between Indivisual and Comprehensive Consideration of River Inundation and Inland Flooding

Sang Do Choi¹, Tae Soo Eum¹, Eun Taek Shin¹, Chang Geun Song^{2*}

¹Ph.D. Student, Dept. of Safety Engineering, Incheon National University

²Associate Professor, Dept. of Safety Engineering, Incheon National University

요약 기후변화에 의해 전례없는 폭우가 빈번하게 내려 도심지에서는 인명 및 재산 손실 등의 침수피해를 반복적으로 겪고 있다. 도심지 침수의 두가지 주요 인자는 하천범람과 내수침수이다. 그러나, 기존 대부분의 연구에서는 침수의 두가지 주요 인자에 의한 복합적인 기작을 무시하고 각 결과를 단순 선형합으로 침수 영향을 산정하여 부정확한 결과를 도출하였다. 본 연구에서는 내수침수와 하천범람을 동시에 모의하여 분석하였다. 하천범람 해석을 위해 Petrov 안정화 기법을 적용하여 충격파의 전달을 정확하게 포착할 수 있도록 하였으며, Flux-blocking 알고리즘을 탑재하여 마름/젖음을 안정적으로 모의하였다. 또한 EGR 기법에 의한 생성/소멸항을 천수방정식에 추가하여 내수침수 해석 모듈을 반영하였다. 내수침수와 하천범람을 동시에 모의하는 경우 침수와 범람에 의한 흐름의 상쇄효과와 증첩효과를 보다 정밀하게 반영할 수 있으므로, 개별합으로 산정한 결과에 비해 정확한 결과를 도출할 수 있었다.

주제어 : 내수침수, 하천범람, 침수해석, 2차원 동수역학 모형, 통합 침수 모의

Abstract Due to the climate change, torrential rain downpours unprecedentedly, and urban areas repeatedly suffer from the inundation damages, which cause miserable loss of property and life by flooding. Two major reasons of urban flooding are river inundation and inland submergence. However, most of previous studies ignored the comprehensive mechanism of those two factors, and showed discrepancy and inadequacy due to the linear summation of each analysis result. In this study, river inundation and inland flooding were analyzed at the same time. Petrov-stabilizing scheme was adopted to capture the shock wave accurately by which river inundation can be modularized. In addition, flux-blocking algorithm was introduced to handle the wet and dry phenomena. Sink/source terms with EGR (Exponentially Growth Rate) concept were incorporated to the shallow water equations to consider inland flooding. Comprehensive simulation implementing inland flooding and river inundation at the same time produced satisfactory results because it can reflect the counterbalancing and superposition effects, which provided accurate prediction in flooding analysis.

Key Words : Inland flooding, River inundation, Inundation analysis, 2D hydrodynamic model, Comprehensive inundation simulation

*This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant 20DPIW-C153746-02).

*Corresponding Author : Chang Geun Song(baybreeze119@inu.ac.kr)

Received August 28, 2020

Revised September 25, 2020

Accepted October 20, 2020

Published October 28, 2020

1. 서론

2020년 6월 24일부터 8월 16일까지 54일간 역대 최장기간의 장마가 이어졌다. 보통 우리나라의 장마기간 평균 강수량은 350 mm 안팎인데 반하여, 2020년에는 장마전선이 저기압과 동반작용하여 한반도 전역에 920 mm가 넘는 기록적인 비가 내렸다. 폭우의 여파로 심각단계의 산사태 위기 경보가 제주를 제외한 전국에 내려졌고, 방재에 취약한 하천은 범람 위기를 맞았으며, 37명의 사망자가 발생하였다. 이와 같이 최근 이상기후에 의해 집중 호우가 발생하는 빈도가 증가하면서 복합적 요인에 의한 침수가 반복적으로 나타나고 있으며, 이에 따라 다양한 피해가 속출하고 있다. 침수의 요인으로는 하천범람(river inundation)과 내수침수(inland flooding)가 존재한다. 내수침수는 우수관망의 통수용량을 초과하는 비가 내려 제내지 내의 빗물이 원활하게 하천으로 배수 되지 못했을 때 발생하게 되고, 하천범람은 호우로 하천 수위가 높아져 하천수가 제방을 월류할 때 발생한다.

기존 대부분의 연구는 내수침수와 하천범람을 각각 해석하여 중첩에 의한 선형합으로 침수범위를 산정하므로, 내수침수와 하천범람을 동시에 복합적으로 모의했을 때의 가중효과를 반영하지 못하는 한계점이 있었다. 이에 본 연구에서는 HDM-2D[1] 모형을 근간으로 한 내수침수 및 하천범람 통합형 침수해석 모형을 이용하여 내수침수와 하천범람의 개별모의의 선형합과 복합적인 모의를 비교 분석하였다.

2. 복합원인에 의한 침수

2.1 기존 연구

백형조 등[2]은 하천범람, 하천범람-내수침수, 하천범람-내수침수배수펌프 작용에 따른 세 경우의 침수심을 비교하였다. 하천범람만을 경제조건으로 하여 모형을 실행하였을 때, 침수피해는 심각하지 않은 것으로 나타났으나, 내수침수를 고려한 경우 상당한 범위까지 피해가 발생하였으며, 배수펌프의 기능을 고려하는 경우 침수심이 알아지는 것으로 분석하였다. 강태욱 등[3]은 FLUMEN과 SWMM 모형을 적용하여 도심지 침수를 모의하였다. SWMM을 이용하여 우수관거 내 홍수 수문곡선을 산정하고 관거 용량을 초과하여 범람한 유량은 FLUMEN을 이용하여 침수 분석을 하였다. 김태형 [4]은 하천범람과 내수침수의 영향을 고려한 침수해석을 실시하였다. 하천수위를 고려한 경우 만관 유량까지 관망을 통해 이동하는 우수가 증가하여 맨홀을 통한 역류가 발생하므로 제방 상단 표고보다 낮은 지형에 위치해 있는 경우에는 하천범람과 내수침수를 동시에 포함하여 분석해야 함을 밝혔다. 조완희 등[5]은 내수침수와 하천범람을 고려한 침수해석을 실시하여 도심지에서의 침수심, 침수범위, 침수시간 등을 예측하고 홍수피해를 저감하기 위한 방법을 제시하였다. 홍수량은 HEC-HMS 모형으로 산정하고, 이 값을 FLDWAV 모형의 입력조건으로 이용하여 하천범람을 해석하였다.

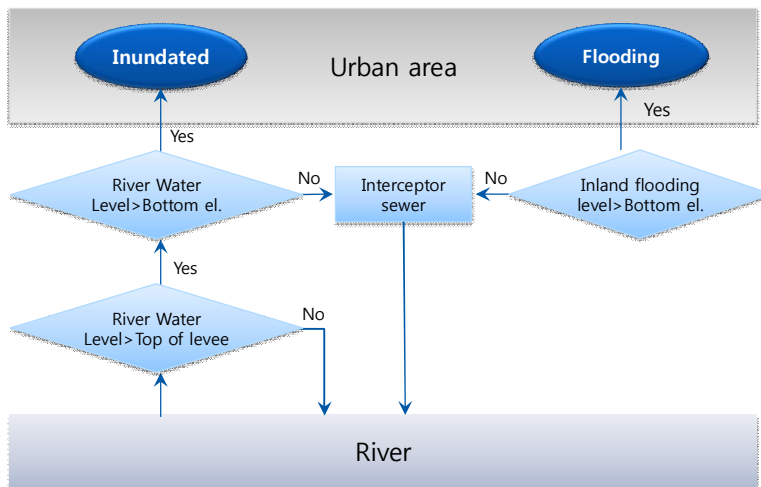


Fig. 1. River inundation and inland flooding in urban area

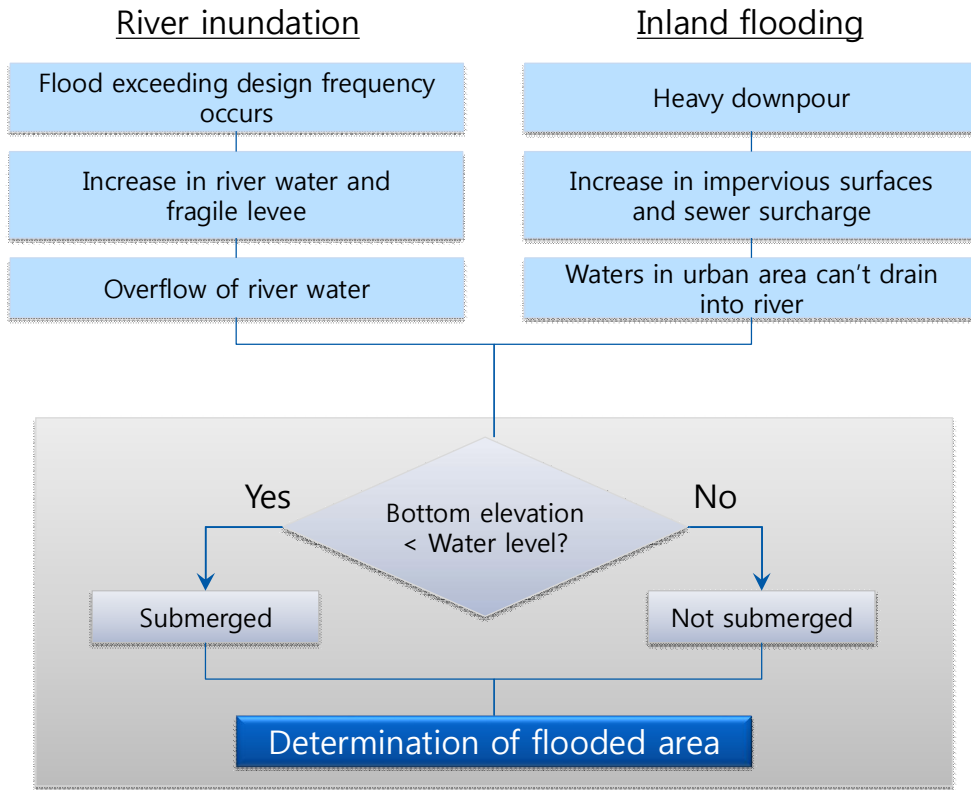


Fig. 2. Flooded area induced by river inundation and inland flooding

또한 내수침수 양상을 해석함에 있어 SWMM 모형에 근간한 2차원 침수해석을 수행하였으며, 빈도 강우량에 대하여 침수심과 침수면적을 계산하였다.

이상과 같이 도심지 침수 영향 분석에 관한 다양한 연구가 진행되었지만, 개별 침수원의 단순중첩에 의한 침수 양상을 분석한 것과 다중침수원을 동시에 고려하여 흐름특성을 비교한 연구는 부족한 실정이다.

2.2 하천범람과 내수침수의 발생

집중 호우 발생 시 도심지 침수피해가 가중되고 있다. 침수를 유발하는 요인으로는 Fig. 1과 같이 내수침수와 하천범람이 존재한다. 내수침수는 폭우가 내릴 때 배수시설의 설계용량을 초과하는 경우 주로 발생한다. 도시화의 일환으로 불투수 표면적이 증가하고 우수관과 배수펌프의 노후화로 인해 빗물이 하천으로 원활하게 배수되지 못하여 주택지 침수 피해를 야기한다. 하천범람은 설계빈도를 넘는 홍수가 발생할 때 나타나며 하천의 급격한 수위 상승과 제방의 부실 등으로 하천수가 월

류하여 도심지 침수피해를 가중시킨다(Fig. 2). 따라서 기후위기가 뉴노멀로 자리잡은 현 시점에서 복수의 침수원으로부터 흘러나온 우수와 하천수의 거동을 정확하게 해석하고자 하는 연구는 매우 필요한 실정이다.

3. 적용 모형

3.1 모형 소개

본 연구에서는 복합적인 침수해석을 위해 통합형 침수해석 모형을 이용하였다. 통합형 침수해석에 사용된 모형은 흐름 해석모듈과 하천범람 해석모듈, 내수침수 해석모듈이 통합된 2차원 동수역학 모형이다. 하천범람 해석모듈은 Petrov 안정화 기법에 의해 하천범람으로 발생하는 충격파의 이동을 정밀하게 포착하며, Flux-blocking 알고리즘으로 마름/젖음 현상을 안정적으로 재현한다. 내수침수의 경우 EGR(Exponentially Growth Rate) 기법[6, 7]에 의한 생성/소멸항으로 침수원을 고려하게 된다.

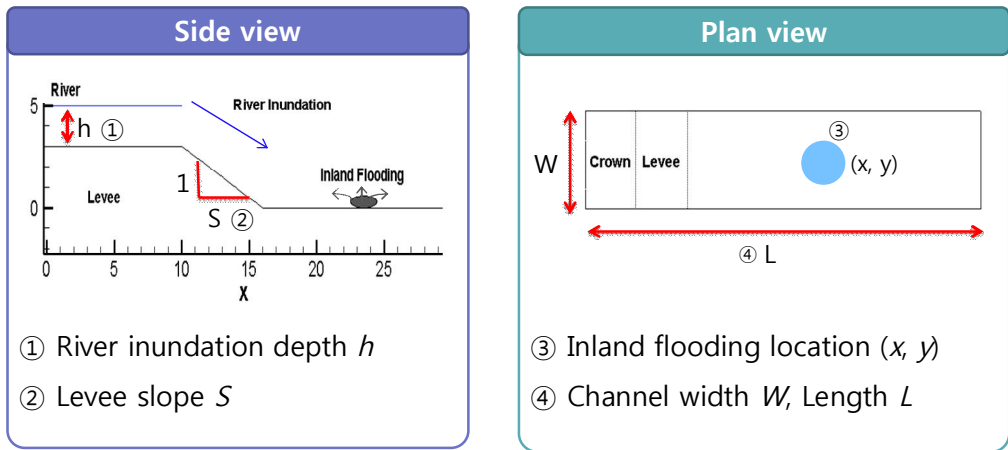


Fig. 3. Significant design factors for river inundation and inland flooding

3.2 모형 검증

HDM-2D[1] 모형의 하천범람과 내수침수 모의성능을 검증하기 위해 다양한 흐름조건 하에서 안정적이고 정확한 해를 도출함을 제시한 기존 연구를 다음과 같이 정리하였다.

Seo et al. [8]은 4가지 성능 평가 기준 문제에 HDM-2D 모형을 적용하여 해의 정확성을 검증하였다. Park et al. [9]은 사류 모의 시 해가 발산하지 않고 벽면 반사 효과를 잘 재현함을 제시하였다. 또한 단면 급팽창부를 통과하는 흐름모의 시 순환 구간을 정확하게 예측함을 보였다. Song and Oh[10]은 충격파가 방사형으로 전파될 때 대칭성이 잘 보존됨을 제시하였다.

또한 천이류 발생 시 모의결과와 우수성을 검증하였다. Song et al. [11]은 임계마름수심 기법에 의한 마름/젖음의 알고리즘을 개발하고, 둔턱 및 조위에 의해 발생하는 마름/젖음 현상을 모의하였다. Park and Song[12]은 감조하천에서 조위조건에 따른 흐름장을 모델링하고 이와 연계하여 오염확산모형을 적용하였으며, Lee and Song[13]은 HDM-2D 모형을 수정 및 확장하여 토석류의 거동을 예측하는데 이용하였다.

이상으로 기존의 다양한 모의 사례를 통해 안정성·정확성·질량보존성·진행파 및 역행파 전파의 포착성 등이 입증된 HDM-2D 모형을 하천범람과 내수침수 해석에 적용하였다.

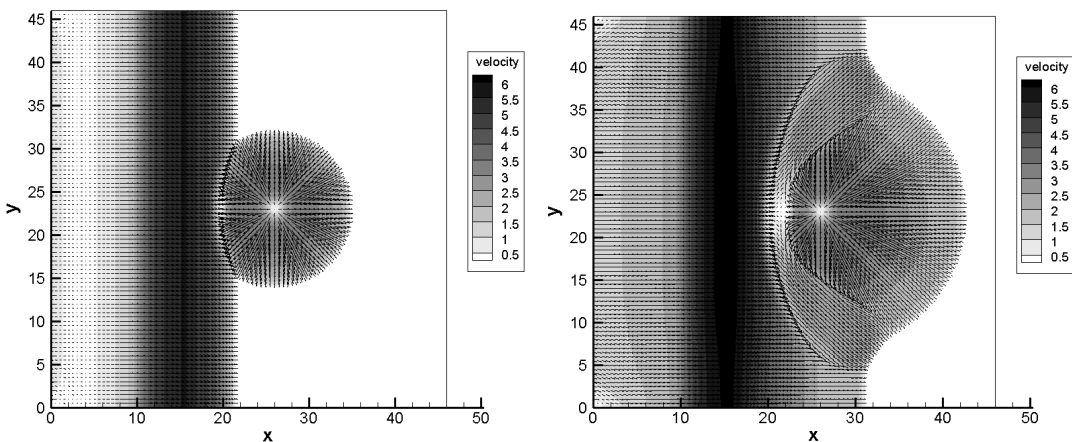
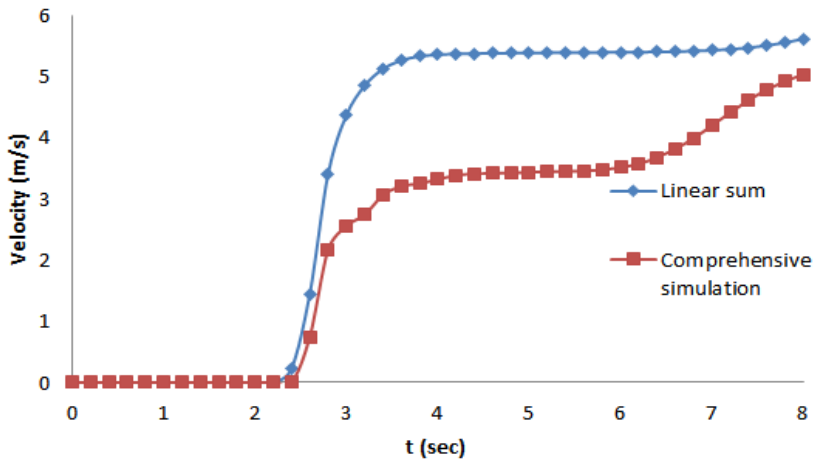
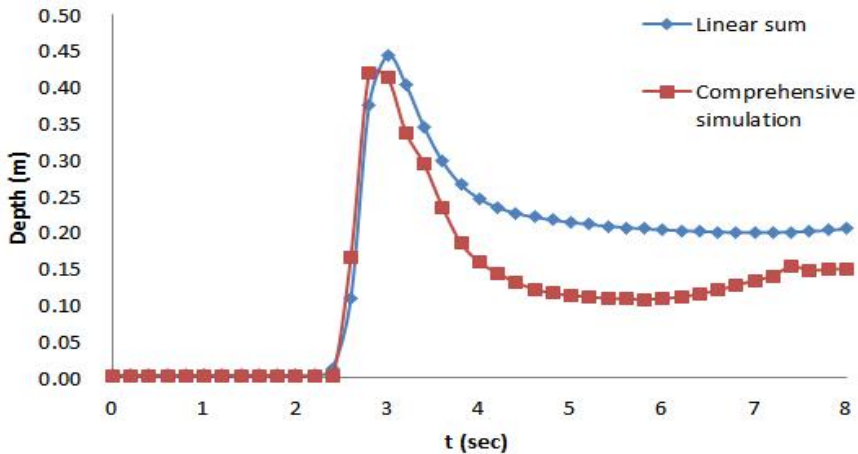


Fig. 4. Velocity vectors configured by inundation and flooding (left: $t=3$ s, right: $t=7$ s)



(a) Velocity



(b) Depth

Fig. 5. Comparison of velocity and depth results according to individual sum and comprehensive simulation at specific point (20, 23)

4. 범람침수 특성의 수치적 분석

4.1 범람침수해석 영향 인자 설계

하천범람과 내수침수의 개별적·복합적 고려에 따른 흐름 특성을 분석하기 위해서는 영향 인자들을 규정해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 수로의 폭(W)과 길이(L)를 포함한 지형정보와 하천범람을 고려하기 위한 월류수위(h)와 제방의 경사(S)를 고려하였으며, 맨홀의 위치(x, y)도 영향인자로 반영하였다. Fig. 3의 설계인자를 바탕으로 수치모의 시간, 결과분석의 용이성, 현장의 대표성 등을 감안하여 다음과 같이 하천범람 수위는 0.5 m, 제방 경사는 1:2, 수로의 길이와 폭은 각

각 46 m, 정사각형 형태(4 x 4 m)를 갖는 내수침수원의 중심좌표는 (26, 23)로 설정하였다.

4.2 범람침수발생의 개별적·복합적 고려에 따른 결과 비교

Fig. 4는 하천범람수가 제방을 타고 내려와서 내수침수원과 만나는 시점에서의 유속과 두 침수원이 합류하여 유하하는 양상을 벡터로 표시한 그림이다. 제방 경사에 의해 하천범람수는 가속되고 있음을 알 수 있으며, 두 침수원이 접하는 면에서는 상호 반대방향 유속에 의해 정체구간이 형성되었다. 또한 두 침수원이 합쳐져서 더욱 강한 흐름이 나타났다.

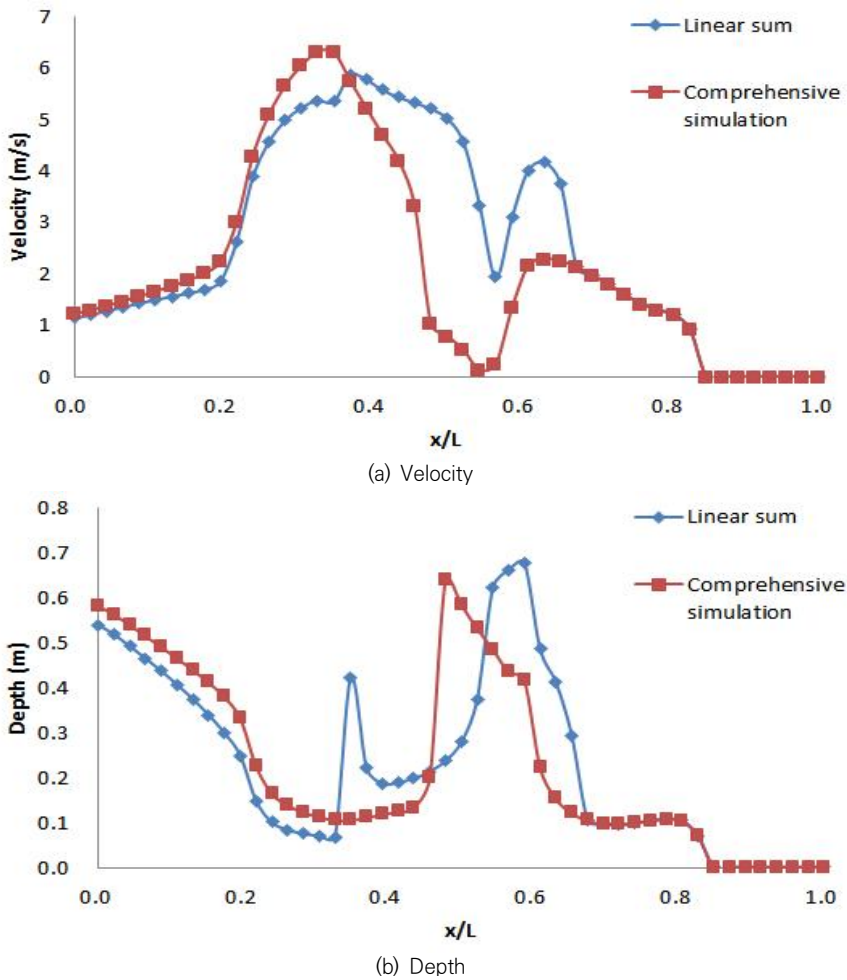


Fig. 6. Comparison of velocity and depth results according to individual sum and comprehensive simulation at specific time (t=7 s)

Fig. 5는 제방을 넘어 흘러 들어온 하천범람수와 내수침수원이 초기에 만나는 지점인 (20, 23)의 좌표에서 시간에 따른 유속과 수심 결과를 비교한 그림이다. 내수침수와 하천범람의 모의결과를 산술적으로 더한 값을 파란선인 'Linear sum'으로 표시하였고, 통합모의 결과를 붉은 선인 'Comprehensive simulation'으로 표시하였다. 통합모의를 한 경우 하천범람과 내수침수의 'Linear sum' 값보다 유속이 작게 나타났다. 초기 2.5 s까지는 (20, 23) 지점에 물이 도달하지 않아 유속과 침수심이 0이었으나 이후 급격하게 유속과 수심이 증가하였다. 두 침수원을 선형적으로 합한 경우 유속을 최대 2배 이상 과대산정하였으며, 침수심의 경우도 시간이 지남에 따라 선형합한 경우가 과대산정하는 경향을 보

였다. 내수침수와 하천범람을 동시에 모의하는 경우 침수와 범람에 의한 흐름의 상쇄효과와 증첩효과를 보다 정밀하게 반영할 수 있으므로, 개별합에 비해 정확한 결과를 도출할 수 있으므로 단순선형합으로 흐름을 예측하는 경우 과다설계될 우려가 높은 것으로 판단된다.

Fig. 6은 특정시간(t=7 s)에서 흐름방향(x)의 유속과 수심을 수로의 길이(L)로 나누어 무차원화한 값을 나타낸다. 통합모의의 경우 내수침수와 하천범람에 의한 유속이 상쇄되어 선형합의 결과보다 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 수심은 통합모의 결과와 선형합의 두 결과가 유사한 패턴을 보였지만 내수침수원 인접 영역에서는 'Linear sum'이, 내수침수와 하천범람이 만나는 곳에서는 'Comprehensive simulation' 결과가 높

게 나타났다. 내수침수와 하천범람의 통합모의는 두 침수원이 만나는 부분에서 속도는 급격히 감소하고 수심은 증가하는 것을 확인할 수 있다.

5. 요약 및 결론

기후위기가 뉴노멀로 자리잡은 현 시점에서 복수의 침수원으로부터 흘러나온 우수와 하천수의 거동을 정확하게 해석하고자 하는 연구는 매우 필요한 실정이다. 그러나 기존 대부분의 연구는 내수침수와 하천범람을 각각 해석하여 증첩에 의한 선형합으로 침수범위를 산정하므로, 내수침수와 하천범람을 동시에 복합적으로 모의했을 때의 가중효과를 반영하지 못하는 한계점이 있었다. 이에 본 연구에서는 HDM-2D(송창근, 2011)[1] 모형을 근간으로 한 내수침수 및 하천범람 통합형 침수 해석 모형을 이용하여 내수침수와 하천범람의 개별모의의 선형합과 복합적인 모의를 비교 분석하였다. 두 침수원을 선형적으로 합한 경우 유속을 최대 2배 이상 과대산정하였으며, 침수심의 경우도 시간이 지남에 따라 선형합한 경우가 과대산정하는 경향을 보였다.

도심지에 폭우가 내리거나 극한홍수가 발생하는 경우 내수침수와 하천범람이 함께 발생하므로 내수와 하천수가 만나는 부분에서 속도는 급격히 감소하고 수심은 증가하는 현상이 나타난다. 따라서 내수침수와 하천범람을 동시에 모의하는 경우 침수와 범람에 의한 흐름의 상쇄효과와 증첩효과를 보다 정밀하게 반영할 수 있으므로, 개별합에 비해 정확한 결과를 도출할 수 있으므로 단순선형합으로 흐름을 예측하는 경우 과다설계의 오류를 범할 수 있는 것으로 판단된다.

REFERENCES

[1] E. T. Shin, J. H. Shin, D. S. Rhee, Kim & H. J. Song, C. G. (2019). Integrated inundation modeling of flooded water in coastal cities. *Applied Sciences*, 9(7), DOI : 10.3390/app9071313.

[2] H. J. Baek, H. S. Lee, Y.K. Yi & D.K. Koh. (2006). Inundation Analysis by the Occurrence of Rivers Flood and the Inland Flood. *Proceeding of The Korean Society of Civil Engineerers*, 2072-2075

[3] T. U. Kang, S. H. Lee, T. H. Jung, J. H. Oh. (2010). Inundation Analysis of Suyoung · Mangmi Lowland Area Using SWMM and FLUMEN. *The*

Korean Society of Hazard Mitigation, 2010(5), 149-158

[4] T. H. Kim. (2013). Flood Risk Mapping Based on the Fuzzy MCDM by Combining Inland and River Inundations with Basin Runoff. *Kyungpook National University Ph.D. Thesis*.

[5] W. H. Cho, Han, Y. A. Kun, K. H. Ahn. (2010). Flood Risk Mapping with FLUMEN model Application. *The Korean society of civil engineers*, 30(2), 169-177

[6] S. McDougall, (2006). A new continuum dynamic model for the analysis of extremely rapid landslide motion across complex 3D terrain. *University of British Columbia*. DOI : 10.14288/1.0052928

[7] T.Takahashi & H. Nakagawa. (1991). Prediction of stony debris flow induced by severe rainfall. *The Japan Society of Erosion Control Engineering*, 44(3), 12-19

[8] I. W. Seo, Y. D. Kim, C. G. Song. (2014). Validation of depth-averaged flow model using flat-bottomed benchmark problems. *The Scientific World Journal*, 2014(18) pages DOI : 10.1155/2014/197539.

[9] I. H. Park, I. W. Seo, Y. D. Kim, C. G. Song. (2016) Flow and dispersion analysis of shallow water problems with Froude number variation. *Environmental Earth Sciences*, 75(120) DOI : 10.1007/s12665-015-4928-z

[10] C. G. Song & T. K. Oh (2016). Transient SU/PG modeling of discontinuous wave propagation, *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, 16(3), 146-162 DOI : 10.1504/PCFD.2016.076221

[11] C. G. Song, Y. H. Ku, Y. D. Kim, Y. S. Park. (2018) Stability analysis of riverfront facility on inundated floodplain based on flow characteristics, *Journal of Flood Risk Management*, 11(1) s455-s467 DOI : 10.1111/jfr3.12233

[12] I. H. Park, C. G. Song. (2018) Analysis of two-dimensional flow and pollutant transport induced by tidal currents in the Han River, *Journal of Hydroinformatics*, 20(3), 551-563 DOI: 10.2166/hydro.2017.118

[13] S. O. Lee, C. G. Song. (2018) Influence of flow resistance stresses on debris flow runoff, *Environmental Earth Sciences*, 77, 426 DOI: 10.1007/s12665-018-7604-2

최 상 도(Sang-Do Choi)

[정회원]



- 2013년 8월 : 한국방송통신대학교 환경보건학과(환경보건학사)
- 2018년 2월 : 인천대학교 안전시스템공학(공학석사)
- 2020년 2월 : 인천대학교 안전공학과 박사과정 수료

- 2004년 5월 ~ 현재 : (주)한국안전연구소 대표이사
- 관심분야 : 안전공학 및 환경관리
- E-Mail : safety333@naver.com

엄 태 수(Tae-Soo Eum)

[정회원]



- 2018년 2월 : 강원대학교 재난관리공학과(공학학사)
- 2019년 8월 : 인천대학교 안전공학과(공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 인천대학교 안전공학과 박사과정

- 관심분야 : 수자원관리, 재난관리, 안전공학
- E-Mail : djaxotn00@inu.ac.kr

신 은 택(Eun-Taek Shin)

[정회원]



- 2018년 8월 : 인천대학교 안전공학과 (공학학사)
- 2020년 2월 : 인천대학교 안전공학과(공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 안전공학과 박사과정

- 관심분야 : 수자원관리, 안전공학
- E-Mail : euntaek.shin@outlook.com

송창근(Chang-Geun Song)

[정회원]



- 2001년 2월 : KAIST 건설환경공학과(공학사)
- 2011년 8월 : 서울대학교 건설환경공학부(공학박사)
- 2013년 8월 ~ 현재 : 인천대학교 안전공학과 교수

- 관심분야 : 범람 및 침수 모델링, 재난안전관리, 위험성평가
- E-Mail : baybreeze119@inu.ac.kr